

# INTERPRETACION DE ANOMALIAS DE POTENCIAL ESPONTANEO APLICADA A UN VERTEDERO DE DESECHOS URBANOS EN EL OCCIDENTE DE MEXICO.

## INTERPRETATION OF SPONTANEOUS POTENTIAL ANOMALIES APPLIED TO A DUMPSITE IN WESTERN MEXICO.

Miguel A. Alatorre-Zamora<sup>1</sup>, Luis Cortina, José O. Campos-Enríquez<sup>2</sup> y Francis S. Birch<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> e-mail: [alatorre2004@hotmail.com](mailto:alatorre2004@hotmail.com) / <sup>2</sup> e-mail: [ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx](mailto:ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx) / <sup>3</sup> e-mail: [fsb@cisunix.unh.edu](mailto:fsb@cisunix.unh.edu)

Recibido: febrero 21, 2007 / Aceptado: febrero 14, 2008 / Publicado: febrero 20, 2007

**RESUMEN.** Fue realizada la interpretación de anomalías de potencial espontáneo en dos perfiles norte-sur medidos en el depósito de desechos caseros de Matatlán, Guadalajara, al oeste de México. El sitio se localiza al este de la Ciudad de Guadalajara, sobre un flanco occidental del cañón del Río Grande de Santiago, y se asienta sobre una pequeña meseta densamente fracturada de andesitas basálticas y riolitas. La interpretación se realizó mediante el uso de tres técnicas numéricas. La primera consiste de un modelado analítico basado en el algoritmo de Fournier; en este algoritmo se propone un modelo del subsuelo, que se ha modificado para obtener potenciales ajustando la resistividad de la zona y asumiendo una variación continua hacia profundidad de la intensidad primaria de la fuente. Los dos restantes son técnicas de inversión basadas en los trabajos de DiMaio y Patella, Birch y Hämam et al. Estos convolucionan los datos con una función de barrido que depende de la geometría de la fuente. Todo esto es útil para inferir las fuentes de las anomalías y determinar presencia de estructuras geológicas que pueden corresponder a fallas o fracturas vinculadas con una posible migración de lixiviados. Los resultados exhiben una alta acumulación de lixiviados que ocurren a una profundidad aproximada a los diez metros. El modelado directo muestra variaciones de la elevación de la superficie freática con respecto al nivel medio del mar, mientras que las técnicas de inversión señalan la extensión vertical de un posible flujo vertical de lixiviados en combinación con una extensión lateral. Los resultados de las inversiones de los dos perfiles exhiben el flujo vertical de lixiviados a lo largo de fronteras planas, ilustrando la presencia de algunas posibles fallas con un rumbo NE-SW o W-E. Debido a la naturaleza del sitio y a la calidad de los datos de potencial espontáneo adquiridos, las anomalías medidas se atribuyen a diferentes niveles en la elevación de los lixiviados y a la migración de los mismos a lo largo de grandes fracturas o fallas. Finalmente, los resultados son apoyados por un modelado de anomalías de Muy Baja Frecuencia que muestran estructuras geológicas similares.

**PALABRAS CLAVE:** Potencial espontáneo, vertedero, lixiviados, inversión, modelado directo.

**ABSTRACT.** An interpretative study of spontaneous potential anomalies was conducted on two north-to-south lines in the Matatlan dumping site of Guadalajara, western Mexico. The site is located to the east of Guadalajara City, in the western edge of the Rio Grande de Santiago canyon and is settled on a highly fractured basaltic andesitic and rhyolitic basement. The interpretation was done using three numerical techniques. The first one consists of an analytic modelling and is based on the Fournier's algorithm; in this a subsurface model is proposed, which is modified by us to obtain potentials adjusting the resistivity of the zone and assuming a continuous variation of the primary intensity source with depth. The other two are inversion techniques based on the works of DiMaio and Patella, Birch, and Hämam et al. They convolve the data with a filtering function that depends on the source geometry. All this work is useful to infer the spontaneous potential sources and to determinate geological structures that could correspond to faults and fractures responsables for a possible leachate migration. The results show a great detailed accumulation of leachates occurring to ten meters in depth approximately. The direct modelling show variations of the water table elevation with respect to the mean sea level, while the inversion indicates the combined vertical and lateral extension of a possible leachate flow. Results of the inversion of the two profiles exhibit a vertical flow of leachates along plane boundaries, showing in this manner presence of possible faultings with NE-SW or W-E direction. Due to the nature of the dumpsite, and on the quality of the acquired spontaneous potential data, the anomalies measured are attributed to different water table levels of leachates and on the migration of the leachates along great fractures or faults. Finally, the results are supported by

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Topografía, División de Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Revolución 1500, S. R., cp. 45220, Guadalajara, Jalisco, México.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Del. Coyoacán, cp. 04510, México, D. F., México.

<sup>3</sup> The University of New Hampshire, Department of Earth Sciences, 121 James Hall, 56 College Road, Durham, N.H. 03824, USA.

modelling of Very Low Frequency anomalies showing similar structures.

**KEYWORDS:** Spontaneous potential, dumpsite, leachates, inversion, direct modelling.

## INTRODUCCION

El crecimiento desmesurado de la población humana trae consigo muchos problemas, entre los cuales destacan la urgencia o necesidad de cada vez más energía y la disposición final de los desechos (aguas negras, industriales, basura casera, desperdicios químicos y nucleares, etc.).

Históricamente, la disposición de los desechos se había venido realizando sin ningún control, sólo manteniéndose a una distancia prudente de poblados cercanos. Con el tiempo estos sitios se colmaron, y por las condiciones ambientales imperantes, comenzaron a contaminar a suelos, aguas subterráneas y aguas superficiales. Como respuesta a ello, diversas disciplinas científicas se han sumado para estudiar y atacar al problema, y para aportar soluciones. Así, la geofísica ingresa al estudio de problemas ambientales, primero, sin grandes modificaciones en sus métodos de investigación, y recientemente, con la aportación de técnicas novedosas para el registro o estudio directo de determinados problemas de contaminación. Este desarrollo de la Geofísica deriva en la subdisciplina que actualmente es denominada Geofísica Ambiental [12, 23], definida como la aplicación de métodos geofísicos a la investigación de fenómenos físico-químicos subsuperficiales cuyas implicaciones para el manejo del ambiente local son significativas. Para este caso los efectos químicos son tan importantes como los fenómenos físicos.

Ciencias como la geofísica, la geología y la geohidrología aplicadas de manera conjunta arrojan procedimientos y métodos de estudio para el análisis del subsuelo.

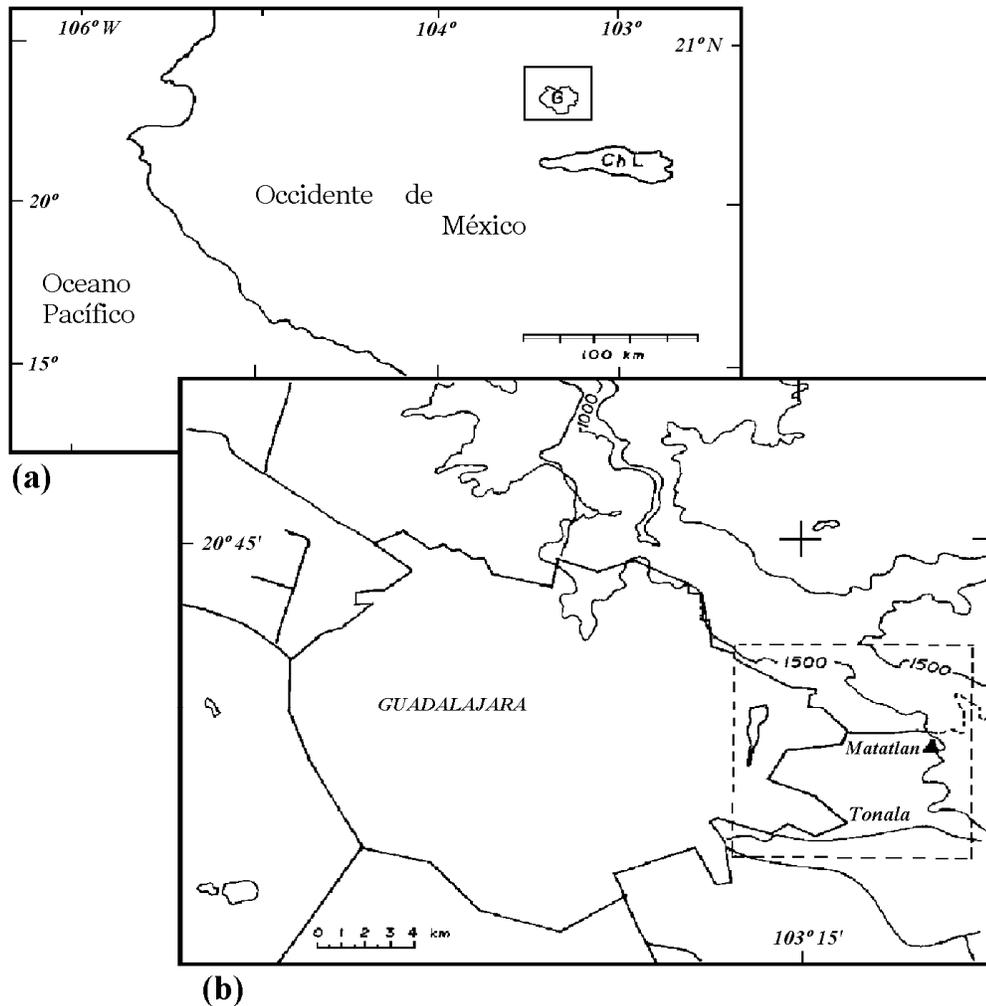
La geofísica también está siendo usada mucho más extensamente sobre rellenos y otros depósitos de desperdicios (e.g., [11, 18, 21, 17, 3]).

El ambiente geológico donde se depositan los desperdicios suele ser muy variable, ya que depende de la geología donde se localizan las poblaciones que generan dichos desperdicios. En México, la mayoría de las ciudades más densamente pobladas se encuentran a lo largo del Eje Neovolcánico, y, por lo tanto, es de esperarse que sus desechos sean depositados sobre diversos tipos de rocas volcánicas: tobas, depósitos cineríticos (México, Morelia, Toluca, Colima), andesitas, riolitas y depósitos pumíticos (Guadalajara, Tepic), etc.

En este trabajo se emplean varios algoritmos de interpretación directa y por inversión de anomalías de potencial espontáneo obtenidas en el vertedero de residuos de tipo doméstico de Guadalajara, en Matatlán, Tonalá, Jalisco, para inferir las fuentes de las mismas y determinar presencia de estructuras geológicas que pueden corresponder a fallas o fracturas vinculadas con una posible migración de lixiviados.

## DESCRIPCION DE AREA DE ESTUDIO

El área de investigación, correspondiente al vertedero de Matatlán, donde Guadalajara depositaba sus residuos de tipo doméstico, se localiza en el occidente de México ([figura 1](#)). El vertedero se halla ubicado unos 15 kilómetros al noreste de Guadalajara, sobre uno de los bordes del cañón del río Grande de Santiago y a una altitud de 1500 metros sobre el nivel del mar ([figura 2](#)). Este vertedero recibía en promedio un volumen de basura aproximado a las 2000 toneladas por día.

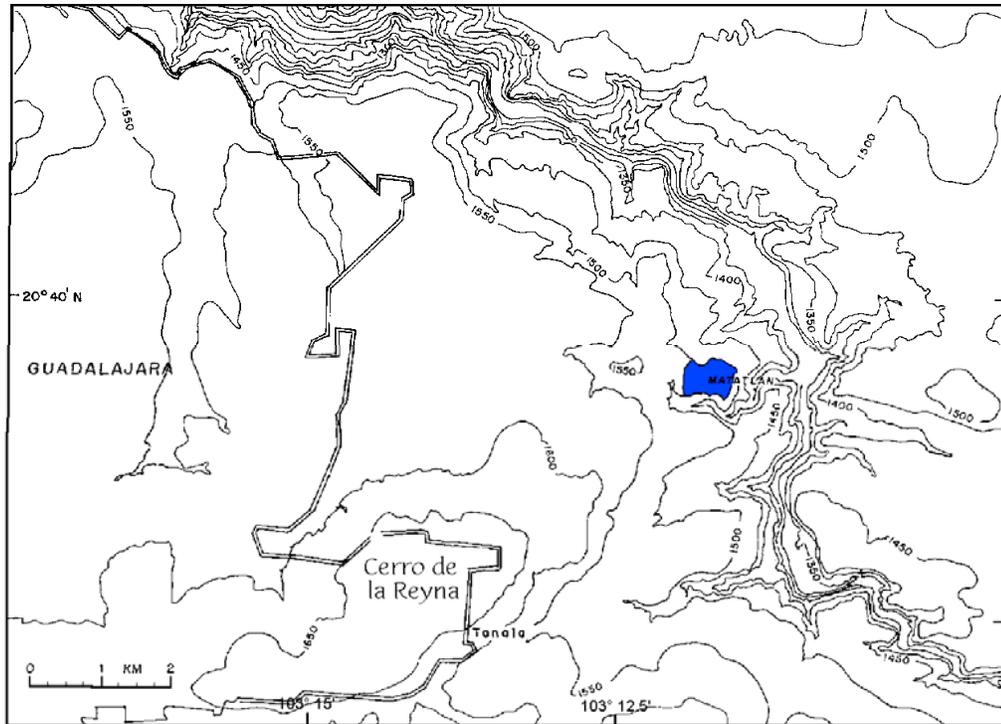


**Figura 1.** Esquema de ubicación del sitio de residuos de tipo doméstico de Matatlán, Jalisco, México. (a) Occidente de México; ChL – Lago de Chapala, G – Ciudad de Guadalajara. (b) Superficie urbana de la Ciudad de Guadalajara y principales curvas de nivel; el recuadro encierra el área exhibida en la figura 2.

Desde un punto de vista estructural, el sistema tectónico al que pertenece el Cañón del Río Grande de Santiago parece producir las fallas y fracturas que se observan en la base del vertedero.

La base del vertedero está formada por andesitas basálticas y tobas ácidas. Los afloramientos de estas rocas exhiben un alto grado de fracturamiento, cuyo origen puede deberse a una combinación de esfuerzos tectónicos y fracturas debidas al enfriamiento propio de este tipo de materiales volcánicos. La disposición de los desechos en el vertedero ha sido intercalada con material terrígeno y bloques riolíticos y andesíticos autóctonos de diversos tamaños, creándose un paquete de 7 u 8 metros. El vertedero muestra una gran producción de lixiviados, que aumentan en cantidad en el verano, provocados por la precipitación pluvial principalmente. Dentro de los trabajos de recuperación del vertedero se construyeron varias fosas donde se trataba de almacenar estos líquidos lixiviados, pero los fracturamientos mostrados en la base del depósito podrían permitir el escurrimiento de estos líquidos fuera del área determinada para los desechos. Incluso, se descubrió un gran flujo de lixiviados cayendo directamente sobre el río Santiago, ubicado a

pocos kilómetros del vertedero. Esto representa un gran problema de tipo ecológico, ya que el área circundante se ha considerado como un área natural protegida por parte del Municipio de Guadalajara.



**Figura 2.** Topografía y localización del sitio de desechos urbanos de Matatlán con respecto a la Ciudad de Guadalajara, mostrada en la Figura 1. En azul se indica el vertedero. Las curvas de nivel más cerradas denotan al Cañón del Río Grande de Santiago.

#### POTENCIAL NATURAL O ESPONTANEO (PE).

Entre los métodos geofísicos más antiguos desarrollados por el hombre están la magnetometría y el de potencial eléctrico natural o espontáneo.

En las últimas tres décadas, el método PE ha sido utilizado para una gran variedad de estudios geotérmicos y geohidrológicos [5] y exploración mineral [4]. En ese sentido el método PE ha permanecido invariable a través de los años, especialmente con respecto a equipo y técnicas de campo [19]. Sin embargo, se le ha dado utilidad en otra clase de problemas, como en el mapeo de fallas [6], o en investigaciones de rellenos sanitarios [16, 2] y contaminación de aguas subterráneas.

La mayor aplicación del método PE en medio ambiente e ingeniería es para investigar movimientos de agua subterránea. Un uso específico ha sido dado para estudiar los flujos que surgen de los depósitos de basura, pisos de reserva y otras estructuras contaminadas [25]; otros estudios incluyen movimientos generales de agua subterránea y delineación de patrones de flujo en la vecindad de deslaves de tierra, fallas, estructuras de drenaje, túneles, etc., o puede ser usado para delinear gradientes de concentraciones químicas.

El método de PE se ha aplicado con buenos resultados a la investigación de vertederos. Esta aplicación es relativamente nueva [25], pero presenta ciertas dificultades al momento de interpretar las anomalías, ya que pueden existir factores externos que modifican las mediciones como líneas eléctricas, reacciones químicas de suelos, movimientos freáticos en el subsuelo por flujo de agua o el movimiento de gases en capas subterráneas, e incluso el crecimiento y la interacción de material vegetal.

#### FUENTES DE ANOMALIAS DE POTENCIAL ESPONTANEO.

Las anomalías de PE pueden ser generadas por gradientes de presión, temperatura o concentraciones químicas en la tierra. La amplitud de la anomalía depende en los productos de esos gradientes y los coeficientes de acoplamiento cruzado que relacionan al flujo de fluidos, calor o materia con el potencial generado; y en la estructura de resistividad eléctrica de la tierra.

Existen PEs producidos por diversos fenómenos. Por ejemplo, los PE electroquímicos pueden ocurrir por contacto de rocas y minerales, metales enterrados, agua subterránea, etc. Sus medidas normales son de aproximadamente 30 mV y pueden alcanzar los 200 mV.

Otras fuentes de potenciales son los rápidos movimientos de agua o gases en el subsuelo o las rocas. Son llamados potenciales de flujo y aparecen por flujos rápidos de agua subterránea y fuertes infiltraciones de las lixiviaciones de los depósitos sanitarios. Los potenciales de flujo son muy cercanos a los 10mV.

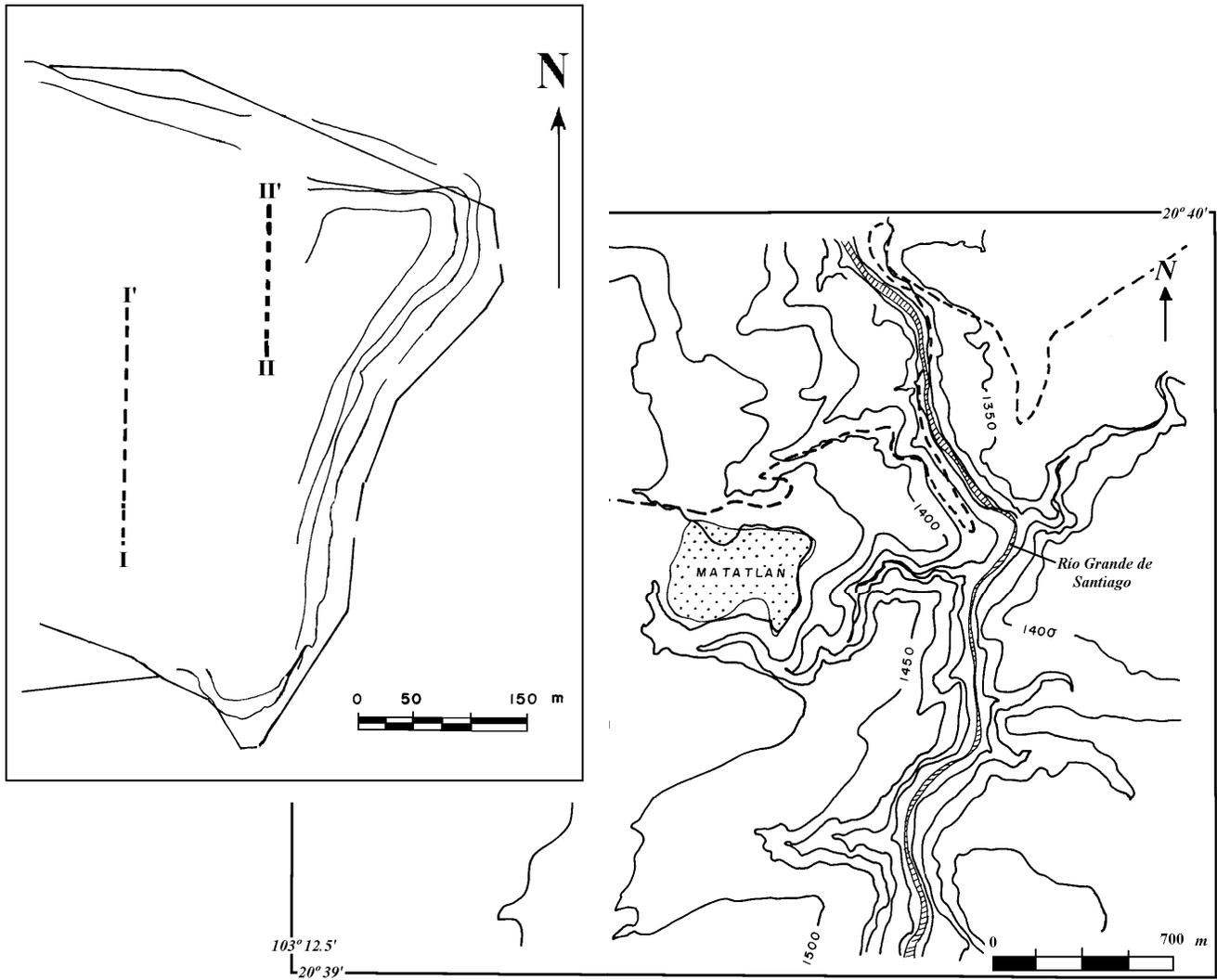
Variaciones temporales significativas de lecturas de PE también pueden ser causadas por movimiento vertical de agua vadosa cercana a la superficie. Este movimiento puede estar relacionado a evapotranspiración de la vegetación [7] ó respuesta del calentamiento solar del suelo subsuperficial [20]. Estas variaciones pueden alcanzar de decenas a centenas de mV, convirtiéndose así en una fuente de ruido y error importante.

La corrosión de metales sepultados como desechos puede generar grandes campos potenciales.

Existen potenciales electroquímicos que pueden ser generados a través de fronteras que separan formaciones con diferente composición en el agua de los poros [14, 15, 20, 22]. Estos potenciales se observan algunas veces cuando se atraviesan fallas o contactos y en algunos casos pueden ser la señal deseada (e.g., para mapeo geológico o detección de contaminantes); en caso contrario, contribuyen al ruido geológico.

#### ADQUISICION DE DATOS DE POTENCIAL ESPONTANEO

Una ventaja de las medidas de PE para la investigación de problemas en el subsuelo es su simplicidad para obtenerlas. El equipo empleado es también muy sencillo, y consta de un par de electrodos no polarizables, un multímetro de alta impedancia y cables. Comúnmente se suele utilizar una solución saturada de sulfato de cobre para rellenar los electrodos.



**Figura 3.** Localización del vertedero de Matatlán con respecto al Cañón del Río Grande de Santiago. En el recuadro superior izquierdo se muestra la situación de la mitad oriental del vertedero y la ubicación de los dos perfiles de potencial espontáneo que se levantaron en dicha mitad. Las líneas paralelas dentro del recuadro indican los límites físicos del vertedero. Los perfiles están marcados con líneas punteadas como I-I' y II-II' y orientadas norte – sur.

El método empleado para la adquisición de los datos de PE es llamado método de gradientes. Este consiste en colocar un electrodo como polo negativo en una estación base, mientras que el polo positivo se mueve hacia delante, considerando distancias entre electrodos adecuadas para estudios ambientales.

Normalmente, se consideran distancias de entre uno y diez metros para esta clase de estudios. Después se desplaza el polo negativo al lugar del polo positivo y se repite la operación. Este procedimiento se aplicó a lo largo de dos líneas de aproximadamente 150 y 200 metros en el extremo oriental del vertedero. El intervalo de mediciones entre electrodos elegido fue de cinco metros a lo largo de las dos líneas ([figura 3](#)). De esta manera se obtuvo un gradiente  $dV/ds$  asignado a un punto medio entre estaciones, donde  $ds$  es el espacio entre los electrodos. Los datos adquiridos fueron integrados para eliminar ruidos de carácter temporal.

Una vez que se tienen datos PE de buena calidad y que se han removido o reducido los efectos de fuentes de ruido geológicas, topográficas, variables en el tiempo u otras, se puede emplear una técnica disponible para interpretarlos.

## TECNICAS DE INTERPRETACION EMPLEADAS

Para interpretar los datos de anomalía de PE se emplearon tres técnicas numéricas, que consisten en un modelado analítico y dos técnicas de inversión. La primera se basa en el algoritmo de Fournier [10], quien propone un modelo del subsuelo, modificado para obtener potenciales, acomodando la resistividad de la zona y asumiendo una variación continua de la intensidad de la fuente primaria con la profundidad. Las dos técnicas de inversión se basan en los trabajos de DiMaio y Patella [6], Birch [1] y Hämänn et al. [13] y representan inversiones mediante convolución de los datos con una función filtrante o de “barrido” que depende de la geometría de las fuentes.

El principio de estos algoritmos puede considerarse una combinación entre un modelado geométrico y uno analítico, porque recrean un patrón con base en una hoja de monopolos o dipolos.

La técnica de Fournier se desarrolla a partir de un régimen de flujo de estado estacionario en el que se define una densidad de corriente total  $i$  como la suma de una “corriente conductiva” de acuerdo a la ley de Ohm, y una “corriente convectiva”, según la ley de Helmholtz [8]. Esta densidad de corriente se describe por:

$$i = -\sigma(\nabla V + C\nabla H)$$

donde  $\nabla V$  es el campo vectorial eléctrico y  $\nabla H$  es el gradiente hidráulico;  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $C$  es el coeficiente de acoplamiento de electrofiltración.

Se asume que el terreno se puede dividir en varias zonas, cada una con propiedades homogéneas sin fuentes de corrientes excepto la electrofiltración. Así, para cada zona:

$$\begin{aligned} \text{div } i &= \nabla^2 \Psi = 0 \\ i &= -\sigma \nabla \Psi \\ \Psi &= V + CH \end{aligned}$$

donde  $\Psi$  es el potencial eléctrico total (la suma de los potenciales “conductivo” y “convectivo”). A través de una interfaz  $S$  entre dos zonas homogéneas la conductividad y los coeficientes de acoplamiento pueden cambiar drásticamente, pero  $V$ ,  $H$  y la componente de  $i$  normal a  $S$  son continuos, así que:

$$\sigma_1 \frac{\partial \Psi_1}{\partial n} = \sigma_2 \frac{\partial \Psi_2}{\partial n}$$

$$\Psi_2 - \Psi_1 = -(C_2 - C_1)H$$

Estas últimas dos ecuaciones caracterizan potenciales de doble capa.

Si, además, se puede asumir que  $\sigma$  es constante a través de  $S$ , el potencial de doble capa creado por  $S$  al nivel de la superficie sería

$$\Psi = -\frac{(C_2 - C_1)}{2\pi} \iint_S H \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{r^3} ds$$

Para un gradiente hidráulico nulo hacia el eje  $Oy$ , la anterior ecuación se convierte en:

$$V(x,0) = -\frac{(C_2 - C_1)}{2\pi} \int_0^L H(x') \frac{[(x-x')\partial h / \partial x' + h(x')]}{(x-x')^2 + h^2(x')} dx'$$

Para el empleo de este algoritmo se deben considerar tres zonas homogéneas: la zona no saturada, la zona saturada y el basamento acuícluido [10]. En la últimas dos expresiones  $\Psi$  es el potencial medido en campo, mientras que  $V(x,0)$  es el potencial que se modela directamente.

El método empleado para reconstruir imágenes de fuentes de PE, tomado de Birch [1], se basa en la adopción que han hecho Hämman et al. [13] de la aproximación propuesta por DiMaio y Patella [6]. Birch [1] lo ha extendido para situaciones de fuentes dipolares.

Para un acuífero simple no confinado es posible modelar anomalías de potencial natural causadas por el flujo de agua subterránea en términos del campo electrostático de una hoja de dipolos eléctricos ubicados en el nivel freático [10]. El momento dipolar por unidad de área de esta hoja es proporcional a la altura del nivel freático sobre el nivel base en el que fluye el agua. Para un estado estacionario, con flujo normal a los contornos topográficos y del nivel freático, la anomalía de potencial natural está dada por la integral de convolución [10, 1]:

$$V(x,e) = -\frac{C}{2\pi} \int \frac{(h-h_m)[- \operatorname{sen} \theta(x-\xi) + \cos \theta(e-h)]}{(x-\xi)^2 + (e-h)^2} d\xi$$

donde:

$e$  = elevación del terreno (m),

$h$  = elevación del nivel freático (m),

$h_m$  = nivel base al que fluye el agua (m),

$x$  = localización horizontal (m),

$\xi$  = variable de integración (m),

$C$  = coeficiente de acoplamiento que vincula el flujo de agua al potencial natural (mV/m) y

$\theta$  = pendiente del nivel freático en  $(\xi, h)$ .

$V(x,e)$  es el potencial que se obtiene de la inversión a la elevación del terreno ( $e$ ).

Para una pendiente muy suave del nivel freático, la ecuación de la integral de convolución se simplifica y se reescribe como una sumatoria:

$$-2\pi V(x, e) = \sum \frac{C(h - h_m)(e - h) \Delta\xi}{(x - \xi)^2 + (e - h)^2},$$

siendo una ecuación estable para filtrado digital, ya que la contribución de cada elemento del nivel freático de ancho  $\Delta\xi$  es independiente de la contribución de los demás elementos.

La diferencia básica entre las dos técnicas de inversión utilizadas en este estudio radica en la función de “barrido” que se emplea para filtrar las anomalías, y que representa a la componente horizontal del campo eléctrico de una línea unitaria de fuente [13, 24]. Mientras que en la terminología de DiMaio y Patella [6] la expresión empleada es

$$G = \frac{(e - h)}{(x - \xi)^2 + (e - h)^2},$$

Hämmann et al. [13] la proponen como

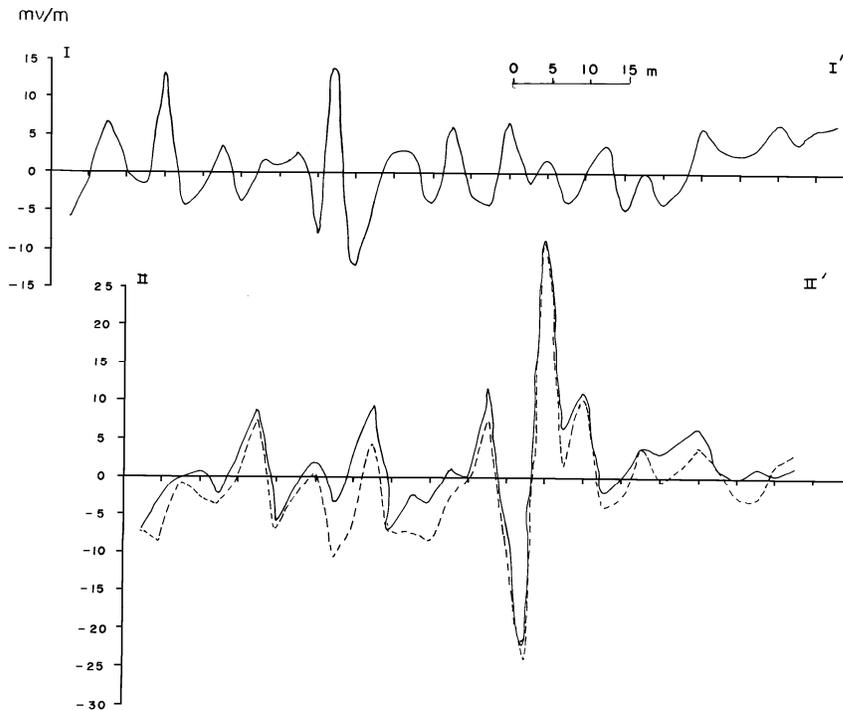
$$G = \frac{(x_j - a)}{(x_j - a)^2 + (-b)^2},$$

Donde  $e$ ,  $h$ ,  $x$  y  $\xi$  son los parámetros expresados en el listado anterior; y  $x_j$  es la posición de la componente de campo eléctrico en la superficie ( $z=0$ ), debida a una fuente elemental localizada en el punto  $(a, b)$ .

## RESULTADOS

Datos de potencial espontáneo obtenidos en Matatlán.

En un vertedero pueden ocurrir PEs producidos por varias clases de fenómenos: migración de líquidos muy conductores (escurrimientos), degradación de la materia orgánica (procesos bioquímicos) y oxidación de elementos metálicos, cambios y diferencias de presión provocados por gases o líquidos, reacciones químicas entre lixiviados y metales, cambios de temperatura, etc. Sin embargo, lo que muestran las líneas obtenidas (figura 4) son una serie de variaciones que corresponden principalmente a la migración de lixiviados en el interior del vertedero y en menor medida a cambios en la composición de la tierra en superficie. Es de esperarse que la línea I-I' muestre gran cantidad de anomalías de PE, preferentemente aportadas por flujos verticales de gases y lixiviados, pues fue levantada sobre una franja deprimida y caracterizada por altas concentraciones superficiales y escurrimientos de lixiviados. Entre ambas líneas hay una diferencia de altura de 2 metros, aproximadamente, siendo la línea II-II' la más elevada.



**Figura 4.** Anomalías de potencial natural, en mV/m, a lo largo de las secciones indicadas en la [figura 3](#).

Resalta una anomalía de 60 mV/m pico a pico en la línea II-II', cuyo carácter (un valor negativo y luego uno positivo) pareciera el de un fenómeno que se puede considerar análogo al de una batería o pila voltaica ([figura 4](#)), pero que también puede corresponder al de una fuente dipolar comprendida por un “nivel freático” de lixiviados [1].

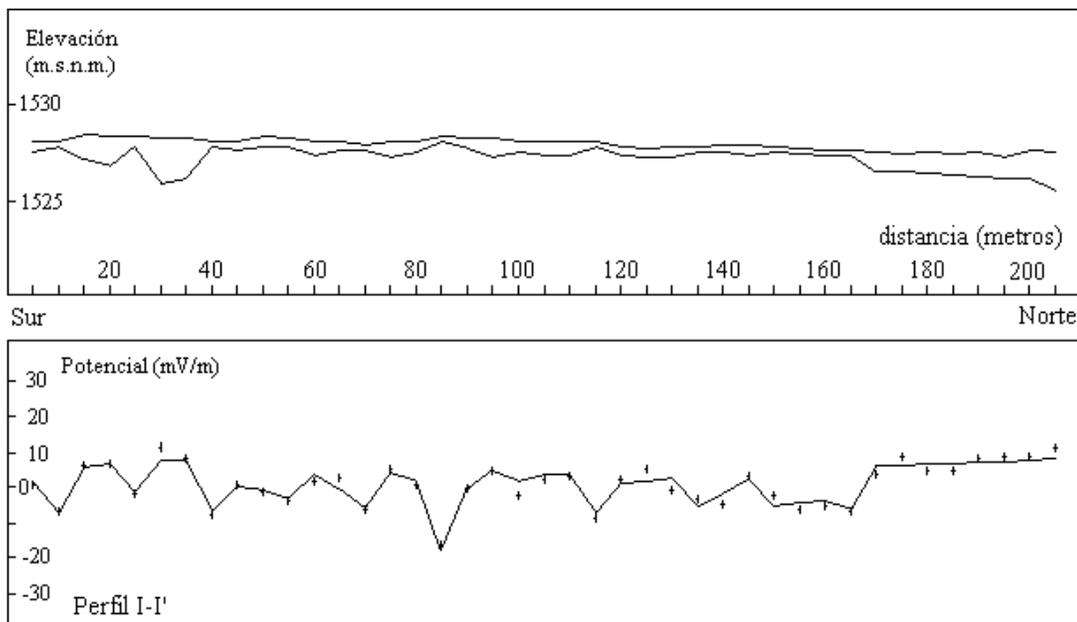
#### DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.

Las secciones de PE obtenidas en Matatlán han sido interpretadas mediante las técnicas ya descritas de Fournier [10], DiMaio y Patella [6], Birch [1] y Hämman et al. [13], desarrolladas en tres programas de cómputo escritos en Truebasic. La técnica de Fournier [10] es una técnica de modelado directo, mientras que las dos técnicas de inversión restantes descansan en el mismo algoritmo con la única diferencia en la función de barrido propuesta tanto por Hämman et al., [13] como por Birch [1]. Estas dos técnicas de inversión consideran prismas rectangulares bidimensionales para desarrollar una convolución con la función de barrido. Las tres técnicas de interpretación fueron usadas alternadamente, hasta obtener la mejor respuesta a una localización de las fuentes de las anomalías. Esto se debió a que no se cuenta con información relativa al coeficiente de acoplamiento electrocinético ( $C$  de ahora en adelante) y a las profundidades de los niveles de lixiviados, aunque éstos últimos aparecían en superficie, formando charcos de lixiviados. Los términos variables que se modificaron alternadamente en todos los casos son  $C$ , la profundidad al nivel de los lixiviados y la longitud vertical de las celdas que se utilizan para modelar en las inversiones. En el modelado directo basado en Fournier [10] se emplean dos valores extremos para las profundidades al nivel de los lixiviados, dentro del vertedero.

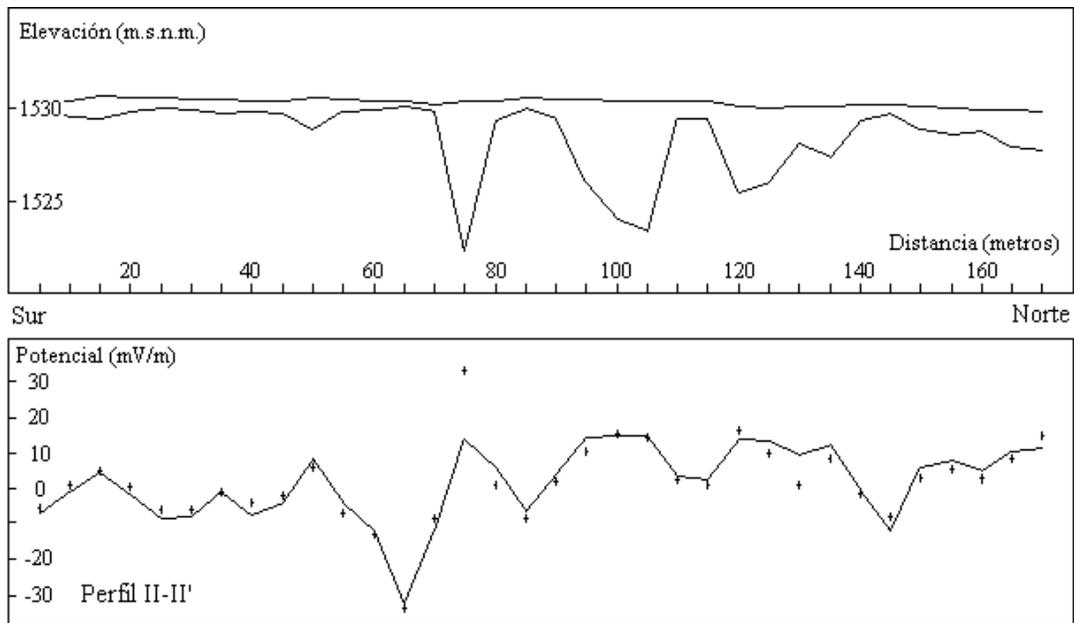
De acuerdo a la ley de Helmholtz, un flujo de corriente eléctrica se puede relacionar al gradiente hidráulico y a un coeficiente de electrofiltración. Este último considera las propiedades físicas y eléctricas tanto del electrolito como del medio poroso por donde el electrolito pasa o ha pasado. Es importante que el electrolito (ya sea agua, un contaminante o la mezcla de ambos) fluya paralelo a una frontera geológica [8, 9] o a su superficie libre, esto es, el nivel freático. Y precisamente ambos casos, es decir, los niveles freáticos de los lixiviados y su posible migración a lo largo de estructuras planas, se han supuesto como los responsables de las anomalías de potencial espontáneo existentes en los dos perfiles. Así se realizaron varias pruebas hasta obtenerse resultados altamente consistentes entre las tres técnicas empleadas. Los resultados del modelado directo se exhiben en las figuras 5 y 6, mientras que los de las inversiones se muestran en las figuras 7 a 16.

El resultado expresado en las figuras 5 y 6 demuestra diferencias en los niveles de los lixiviados, y estas diferencias se consideran como las responsables de las anomalías de potencial espontáneo, al generar un flujo.

Por ejemplo, el valor observado en la estación 17 (85 metros en el perfil I-I', de sur a norte) parece deberse a un nivel de lixiviados que casi toca la superficie. Este comportamiento es más o menos general en todos los puntos ubicados entre los 40 y los 165 metros (figura 5), mientras que en el extremo norte este nivel de líquidos se profundiza a casi 3 metros bajo la superficie. Un nivel de lixiviados demasiado somero se esperaba, pues durante las mediciones del potencial natural se apreciaron varias acumulaciones de líquidos en la superficie. Por otra parte, un nivel de líquidos más profundo en el punto localizado entre los 30 y 35 metros pudiera deberse a la presencia de una zona de fracturas que permite la migración vertical de los lixiviados.



**Figura 5.** Interpretación directa del perfil de potencial espontáneo I-I', usando la técnica de Fournier. La línea de cruces corresponde a los datos observados, mientras que la línea continua corresponde a la anomalía calculada.



**Figura 6.** Interpretación por modelado directo del perfil de potencial espontáneo II-II', usando la técnica de Fournier. La línea de cruces corresponde a la anomalía observada, mientras que la línea continua es la anomalía calculada.

En el perfil II-II' es posible una mayor presencia de fracturas por donde migran los lixiviados, con respecto al perfil I-I'. Destacan tres puntos donde se percibe tal comportamiento: a 75, 105 y 120 metros de sur a norte, mientras que por otra parte se presenta un nivel promedio de líquidos a aproximadamente dos metros de profundidad (figura 6). Este nivel promedio concuerda con el nivel que tienen los lixiviados en el perfil I-I', pues entre ambos perfiles hay una diferencia de casi dos metros de altura con respecto a la superficie. El nivel de los líquidos en el perfil II-II' tiende a profundizar hacia el norte de nuevo, lo que podría representar una migración provocada por la influencia de desechos nuevos que se depositaban durante los levantamientos en ese punto. Los modelos directos fueron obtenidos empleándose un  $C$  constante de 1.25 mV/m.

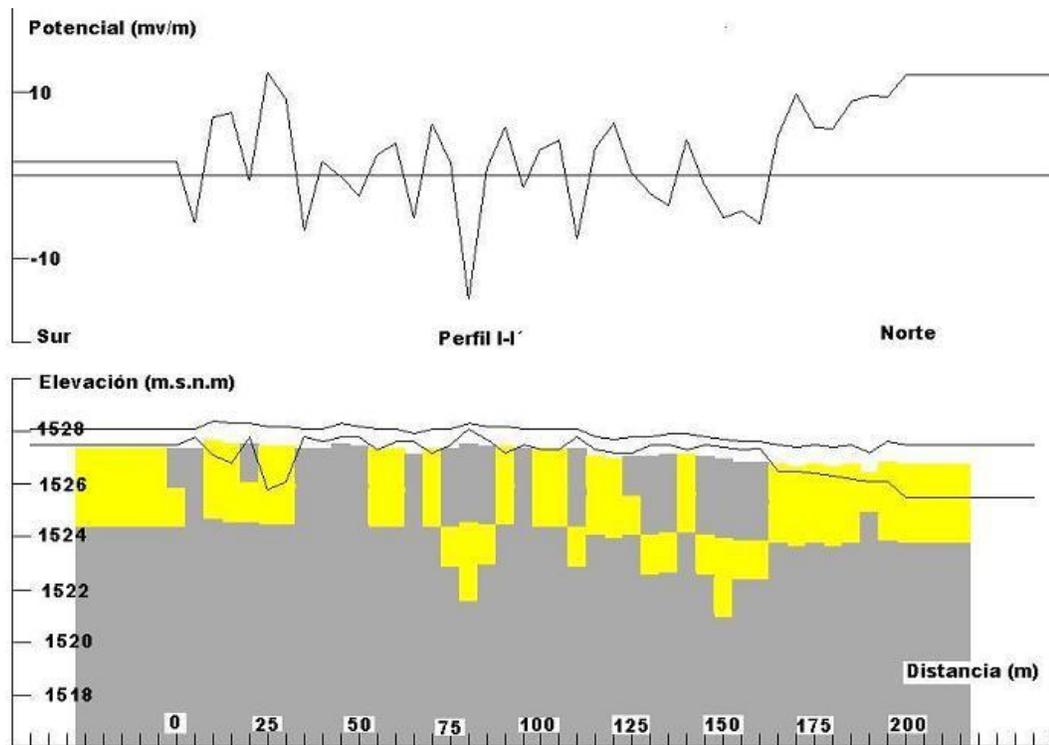


Figura 7.- Inversión del perfil I-I', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=5.75$  metros, y un coeficiente de acoplamiento electrocinético de  $0.5$  mV/m.

Las inversiones de igual forma se complementan entre sí y se guían con el modelado directo. En la primera inversión realizada sobre el perfil I-I', (figura 7) se empleó un  $C$  de  $0.5$  mV/m como umbral; esto es, se calculan valores de  $C$  que se comparan con el valor de  $0.5$  mV/m, y los valores calculados de  $C$  mayores que éste último se consideran fuentes interpretadas a manera de celdas que se agrupan en color amarillo. El área en gris representa a un subsuelo con un  $C$  menor que  $0.5$  mV/m.

Las áreas en amarillo son la inferencia de las fuentes de las anomalías. La inclusión de las curvas del nivel "freático" de lixiviados del modelado directo en los resultados de estas primeras inversiones ayuda a comparar ambas interpretaciones, que muestran posibles fuentes muy semejantes. Sin embargo, en la inversión la presencia de zonas amarillas de posición vertical indica flujos verticales de varias extensiones como fuentes de las anomalías.

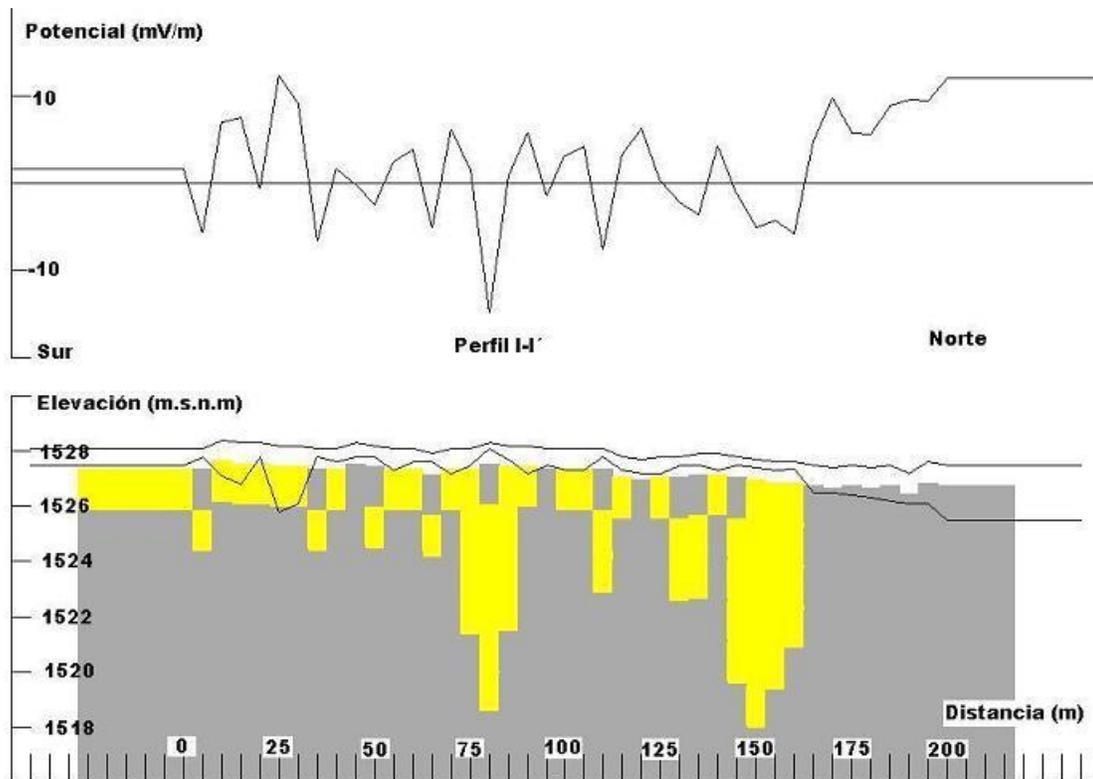


Figura 8.- Inversión del perfil I-I', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=3.75$  metros, y un coeficiente de acoplamiento electrocinético de  $0.1$  mV/m.

Además del coeficiente de acoplamiento, en las inversiones realizadas mediante la técnica de DiMaio y Patella [6] se ha establecido como variable la profundidad al nivel freático (HM en las figuras). En la primera inversión ([figura 7](#)) se ha trabajado con un nivel freático localizado a una profundidad de  $5.75$  m.

En un segundo caso se obtiene la inversión para un  $dz=1.5$ , un  $HM= 3.75$  m y un  $C$  de  $0.1$  mV/m ([figura 8](#)). Resalta en este caso un nivel de lixiviados por debajo aún del nivel promedio obtenido mediante el modelado directo, y el desglose de varias fuentes que se pueden interpretar como flujo vertical de los mismos. Las áreas amarillas que sobrepasan por debajo de los  $1520$  m.s.n.m. representan el flujo a lo largo de dos fronteras que pueden corresponder a dos estructuras geológicas semejantes a fallas, las que más profundizan y localizadas a  $80$  y  $150$  m en el perfil, respectivamente ([figura 8](#)). Es de notar la configuración que adquieren las posibles fuentes, asemejándose demasiado a la anomalía observada.

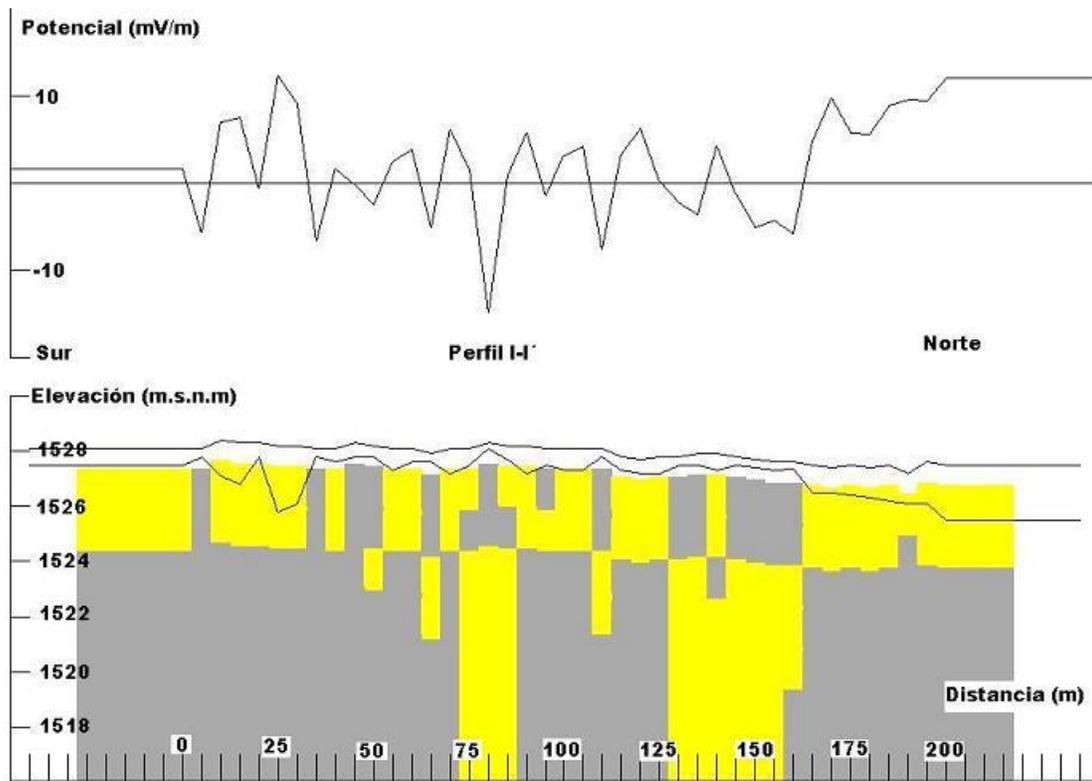


Figura 9.- Inversión del perfil I-I', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=5.65$  metros, y un coeficiente de acoplamiento electrocinético de  $0.01$  mV/m.

Una tercera prueba consistió en la aplicación de un  $C$  de  $0.01$  mV/m y un  $HM$  de  $5.65$  m. El comportamiento de las posibles fuentes emitidas en esta inversión es semejante al del caso anterior, pues aparecen fuentes en los mismos puntos. La diferencia estriba en que en este caso ([figura 9](#)) las posibles fuentes profundizan. Esto nos habla del efecto de la variación del  $C$ : a menor valor en  $C$ , las fuentes posibles ocurrirían a mayor profundidad. La variación del nivel freático sólo modifica la profundidad de la presencia de las anomalías más conspicuas.

Para una cuarta prueba se aumentó sustancialmente el  $C$ , proponiéndose que fuese semejante al aplicado en el modelado directo, es decir, de  $1.25$  mV/m, mientras que el  $HM$  se consideró casi semejante al caso anterior, estableciéndose en  $5.75$  m. Esta prueba se expone en la [figura 10](#), en la que se aprecia mejor el aislamiento de determinadas fuentes, muy semejantes al modelo directo. En este caso las posibles fuentes serían flujos verticales descendentes, que estarían migrando en el seno del vertedero, es decir, en el interior del paquete formado por terrígenos y bloques de rocas riolíticas + desechos.

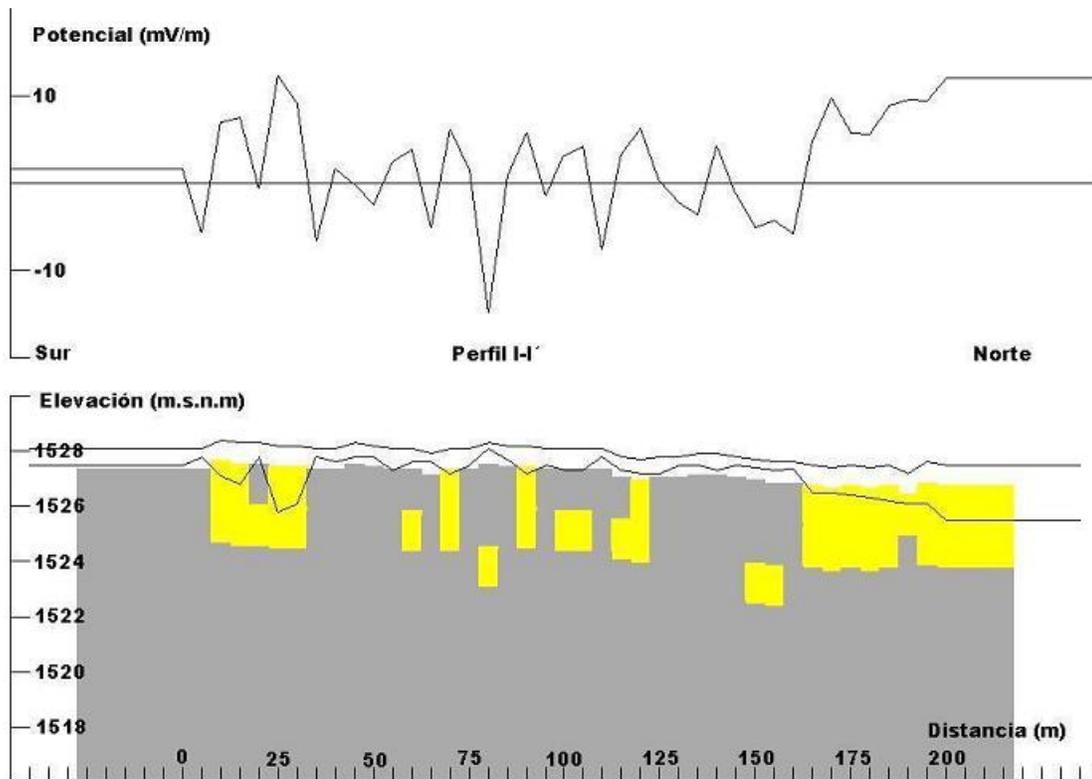


Figura 10. - Inversión del perfil I-I', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=5.75$  metros y un coeficiente de acoplamiento electrocinético de  $1.25$  mV/m.

Finalmente, se decidió realizar una quinta prueba, con un  $C$  muy bajo ( $0.1$  mV/m), así como una mayor profundidad del nivel freático, quedando en  $8.65$  m (figura 11). En este caso los flujos de lixiviados descienden a mayor profundidad, hasta alcanzar la posible base del paquete del vertedero; entonces ahí el comportamiento de estos lixiviados parece cambiar, migrando posiblemente por estructuras geológicas como grandes fracturas o fallas que rompen la misma base del vertedero, conformada principalmente de rocas andesíticas basálticas.

La situación de las fuentes en la inversión del perfil II-II' es semejante a los resultados anteriores, pero en estos nuevos casos se emplea un valor de  $C$  mayor, concordante con el valor del modelado directo y de la cuarta prueba de la inversión del perfil I-I' (figura 10), y un valor para el nivel freático que concuerde también con el cambio de nivel topográfico exhibido por ambos perfiles.

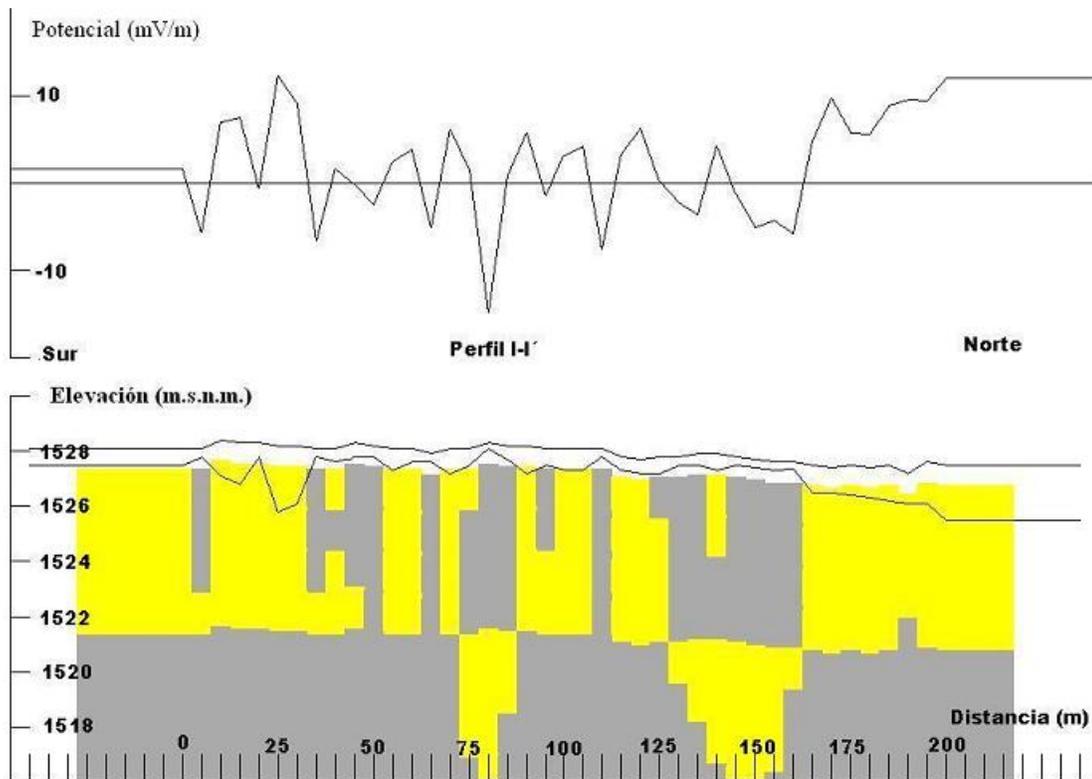


Figura 11. - Inversión del perfil I-I', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=8.65$  metros y un coeficiente de acoplamiento electrocinético de  $0.1$  mV/m.

No obstante, la longitud de las fuentes se equipara bastante con las profundidades obtenidas mediante el modelado directo (figura 12). La fuente de mayor extensión que se localiza en el extremo norte de los dos perfiles puede corresponder a un mayor flujo vertical provocado por la deposición de desechos recientes durante la adquisición de los datos. En el caso de la figura 12 se ha empleado un  $C$  de  $1.0$  mV/m, mientras que el nivel freático se ha fijado en  $7.45$  m. A diferencia de los comportamientos de las fuentes en el perfil I-I', en donde aparece flujo vertical descendente por debajo del nivel freático, en el perfil II-II' no ocurre así. En el perfil II-II' más bien los lixiviados tienden a alojarse o acumularse sobre la base del vertedero (figura 12), lo que es más notorio sobre la parte central del mismo perfil II-II'. La aparentemente única semejanza en el comportamiento de las fuentes entre ambos perfiles es la fuente amplia que se localiza al norte de los dos perfiles, lo que parece probar una mayor producción de lixiviados en esa porción de los perfiles debida a las acumulaciones de desechos recientes durante el periodo de las mediciones, ya que existe una alta correlación entre producción de lixiviados y las fuentes de las anomalías de PE.

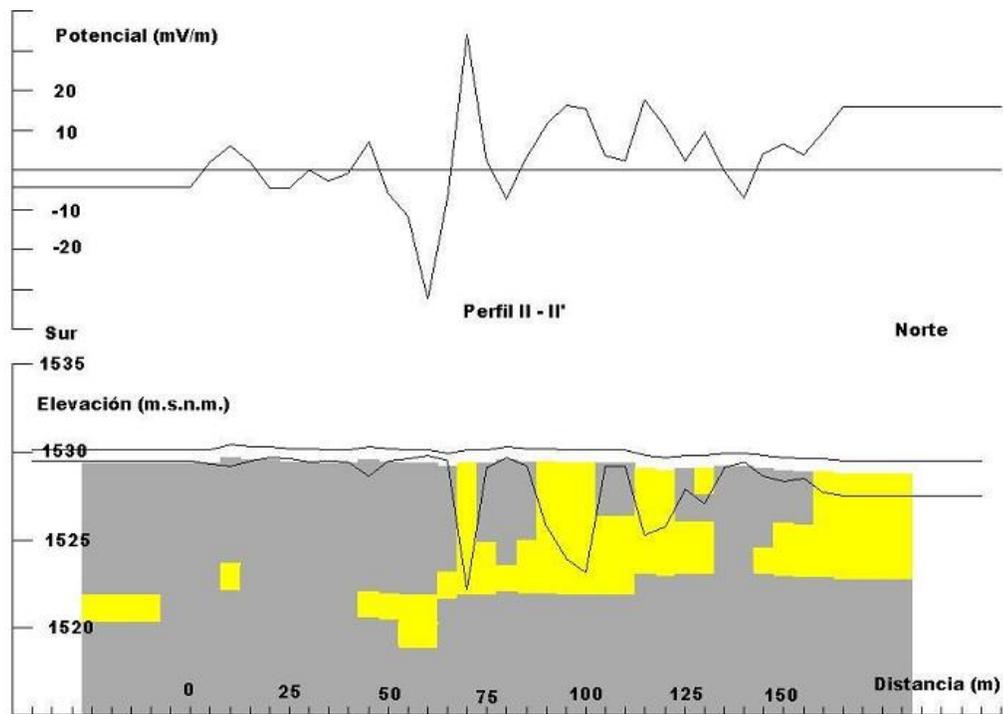


Figura 12. - Inversión del perfil II-II', basada en la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=7.45$  metros y un coeficiente de acoplamiento electrocinético (C) de 1.0 mV/m.

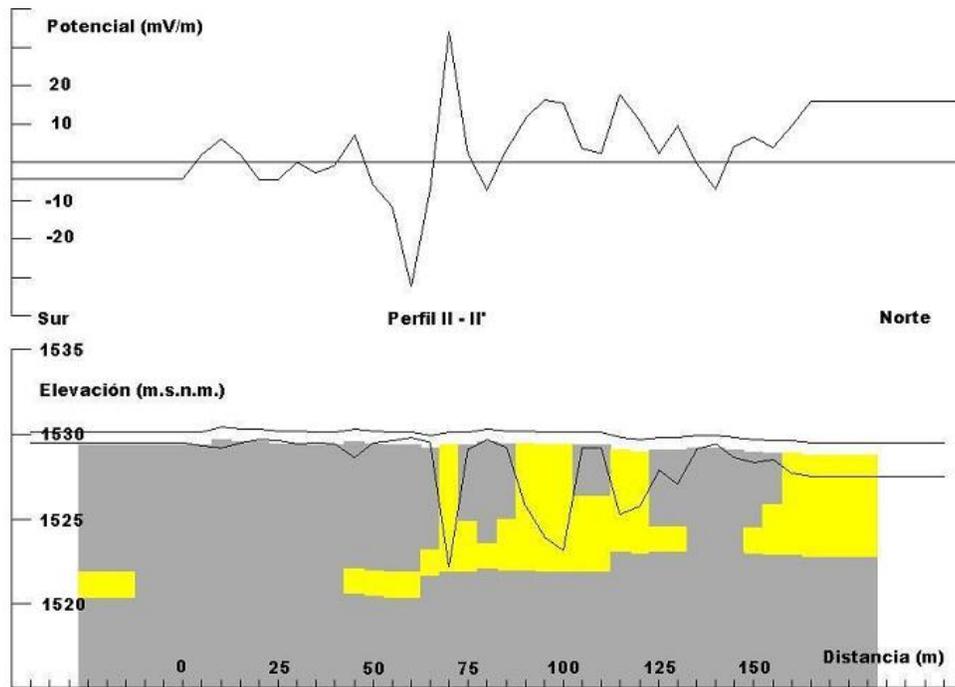


Figura 13.- Inversión del perfil II-II', empleando la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=7.45$  metros y un coeficiente de acoplamiento electrocinético ( $C$ ) de  $1.2$  mV/m.

Para un valor ligeramente mayor de  $C$  el comportamiento de las fuentes es semejante al caso de la figura 12; en esta prueba las fuentes tienden a desaparecer levemente (Figura 13).

Finalmente, con respecto a la inversión en la que se emplea la técnica de DiMaio y Patella [6], se realizó una tercera prueba, con un  $C$  de  $1.2$  mV/m, pero un nivel freático más profundo ( $9.75$  m). En este caso (figura 14) continua apareciendo la fuente de la porción norte, debida probablemente a la productividad de lixiviados por desechos recientes, y siguen apareciendo las mismas fuentes de los dos casos anteriores, pero la fuente que se localiza en la distancia horizontal de  $70$  m se divide en dos.

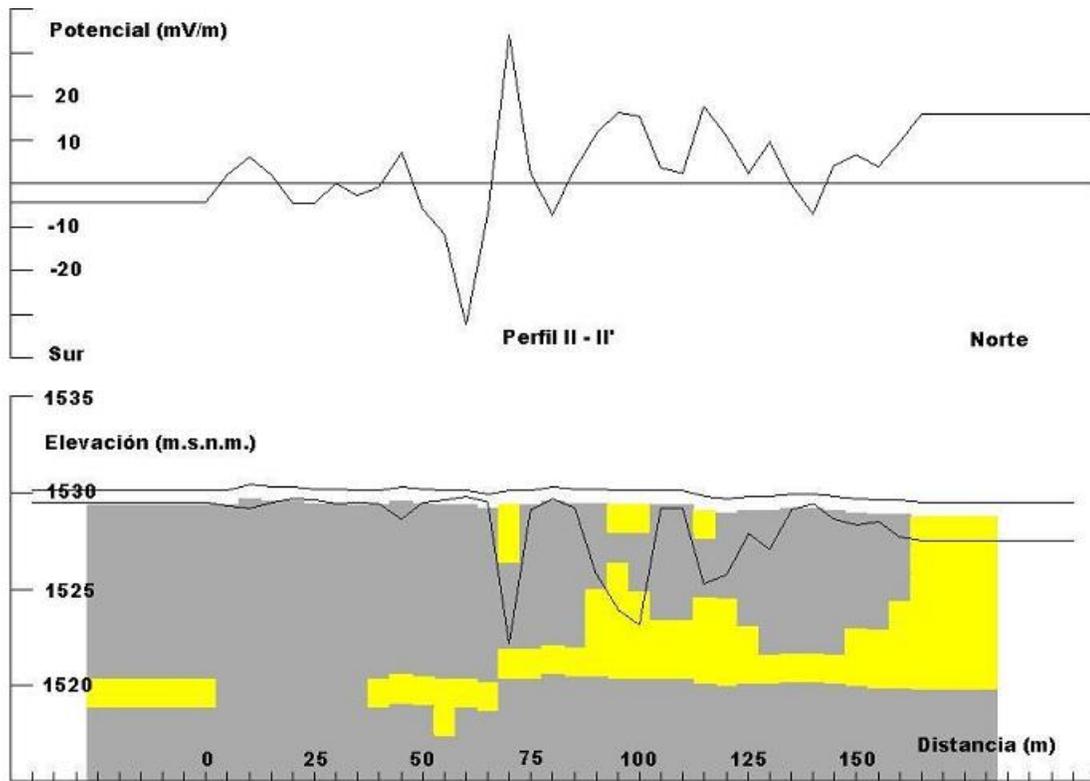
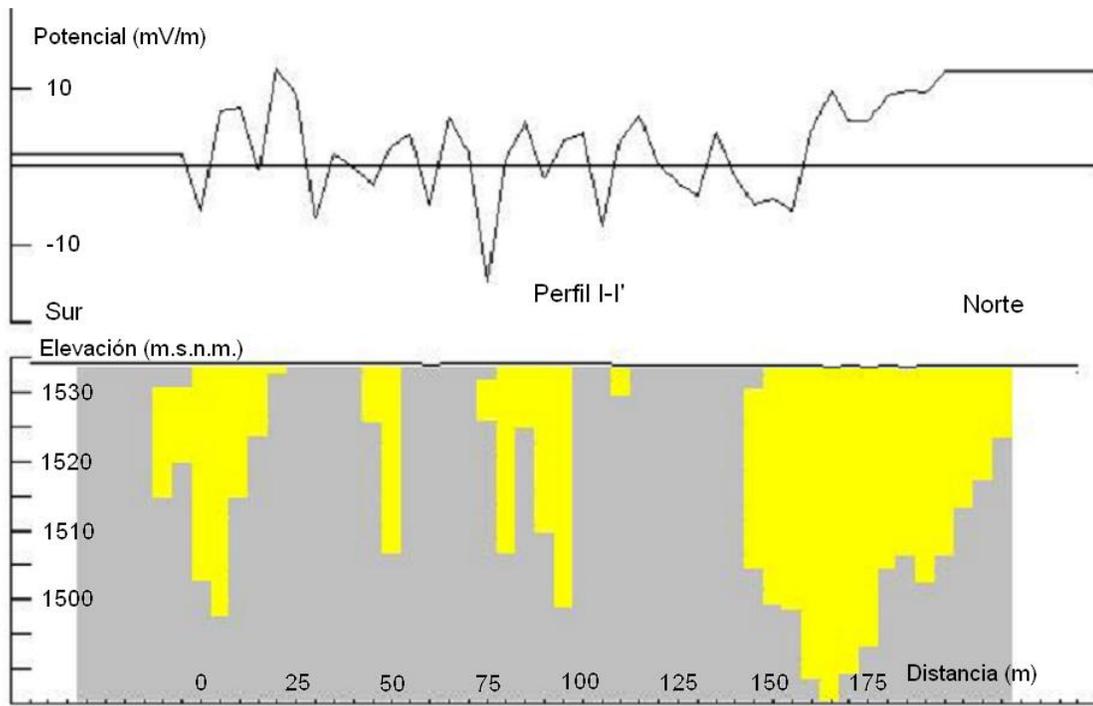
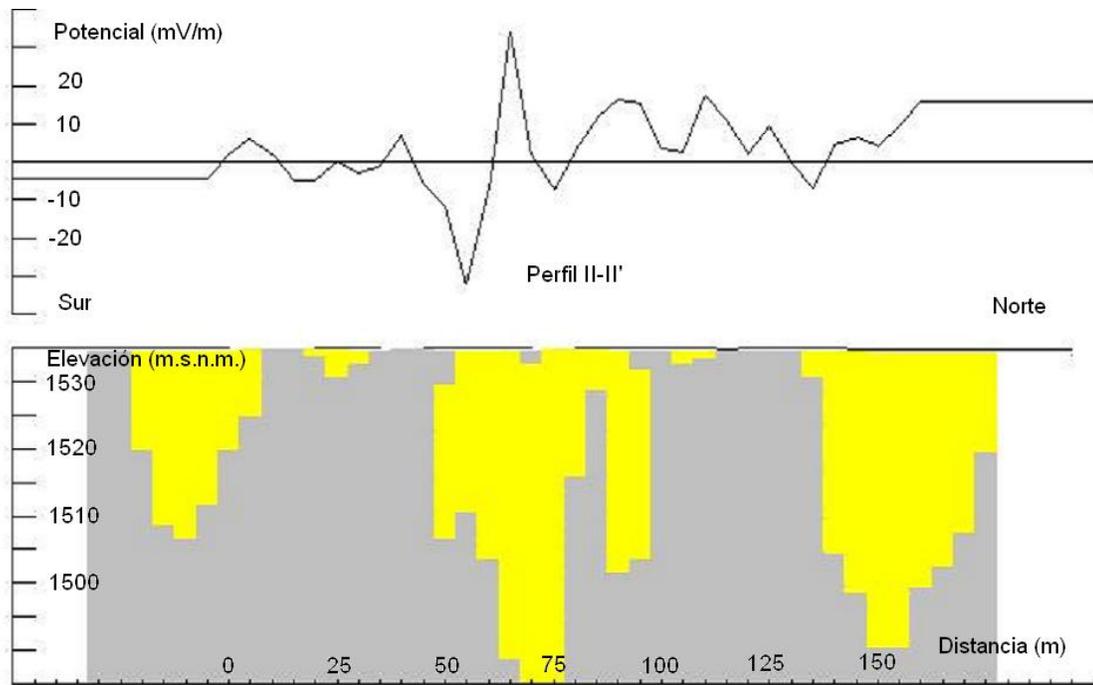


Figura 14.- Inversión del perfil II-II', mediante la técnica de DiMaio y Patella, modificada por Birch, para un  $dz=1.5$  metros, un  $HM=9.75$  metros y un coeficiente de acoplamiento electrocinético (C) de  $1.2$  mV/m.

Si los resultados de estas primeras inversiones de los dos perfiles exhiben el flujo vertical de lixiviados a lo largo de fronteras planas, ilustrando la presencia en específico de algunas fallas, estos rasgos estructurales tendrían un rumbo aproximadamente NE-SW, aunque podría marcarse también la presencia de estructuras geológicas como fallas o fracturas más pequeñas o de menor extensión.



**Figura 15.** Inversión del perfil I-I', basada en la técnica de Hämmann et al., modificada para este estudio, para un  $dz=2.0$  m y un coeficiente de acoplamiento electrocinético (C) de 1.25 mV/m.



**Figura 16.** Inversión del perfil II-II', basada en la técnica de Hämmann et al., modificada para este estudio, para un  $dz=2.0$  m y un coeficiente de acoplamiento electrocinético (C) de 1.25 mV/m.

En las inversiones basadas en la función de barrido y la técnica de Hämmann et al. [13] ya se emplean valores de  $C$  cercanos al empleado en el modelado directo. Por ejemplo, en la [figura 15](#) se utiliza un  $C$  de 1.25 mV/m y un  $dz$  de 2.0 m para las celdas-fuentes. En este resultado de inversión se presentan las fuentes más importantes que aparecen en las inversiones mostradas en las [figuras 7](#) y [10](#), como el rasgo vertical que se aprecia entre los 5 y los 20 metros en ambas inversiones ([figuras 7](#) y [15](#)).

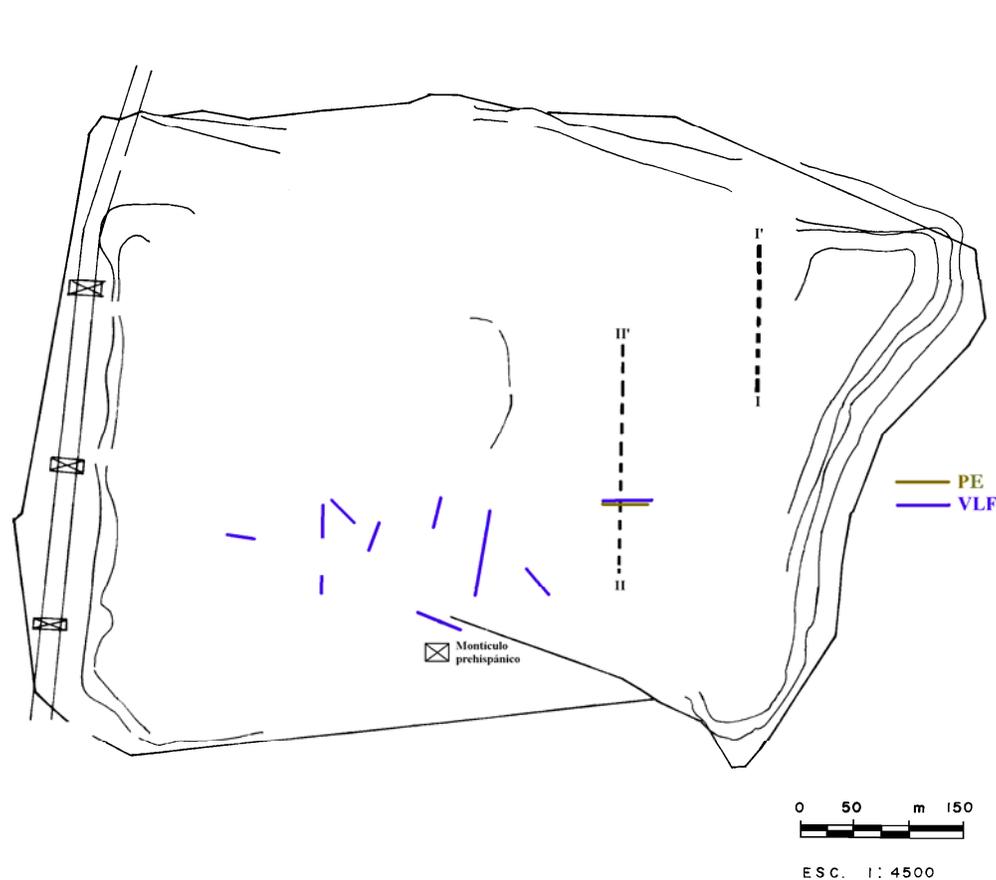
Para esta inversión las fuentes verticales interpretadas tienden a profundizar muy por debajo de los 1520 m.s.n.m., lo que es ejemplificado por el rasgo que se interpreta a aproximadamente 80 metros sobre el perfil I-I', y que parece producir la anomalía negativa localizada en el mismo punto.

La inversión del perfil II-II' muestra similares resultados. Por una parte, el empleo de un  $dz$  de 2.0 metros aumenta la amplitud horizontal de las fuentes ([figura 16](#)). De alguna manera estos dos resultados indican que se deben emplear valores menores de  $dz$ . El valor de 1.5 m para  $dz$  ha mostrado los mejores resultados hasta este punto, en las inversiones anteriores.

En general, los resultados de esta inversión concuerdan bastante con la inversión expuesta antes, basada en DiMaio y Patella-Birch, aunque la inversión del perfil II-II' realizada mediante el algoritmo de Hämmann modificado presenta fuentes de mayor amplitud horizontal, y sobre todo vertical, lo que podría indicar un fracturamiento más excesivo del basamento andesítico-basáltico del vertedero.

La diferencia existente básicamente entre el par de técnicas de inversión y la técnica de modelado directo radica en que el modelado directo sólo muestra la disposición topográfica y de profundidad del nivel freático, mientras que las técnicas de inversión señalan la extensión vertical de un posible flujo en combinación con la extensión lateral, en este caso, de los lixiviados.

La información generada por la interpretación directa y por inversión de las anomalías de PE se robustece al compararla con los resultados inéditos aportados por la interpretación de anomalías obtenidas mediante un método electromagnético denominado Muy Baja Frecuencia (Very Low Frequency, o VLF, por sus siglas en inglés), que no se muestra en este trabajo. El método de VLF es muy sensible a la presencia de estructuras geológicas como fallas, y muy en particular que se hallen humedecidas en el subsuelo, ya sea por líquidos contaminantes o por aguas subterráneas. Destaca la inferencia de una falla señalada por ambos métodos, de rumbo aparentemente W-E y que podría permitir la migración de lixiviados fuera del vertedero con la misma dirección ([figura 17](#)). Tal falla aparece perpendicular al perfil II-II'. Debido a la naturaleza de este estudio, y en particular de que no era el objetivo del mismo hacer una investigación geológica en los alrededores del vertedero, sobre todo para identificar fallas o estructuras geológicas similares, no es posible determinar si tal falla de orientación aparente W-E existe fuera del vertedero hacia su extremo oriental. Sin embargo, es posible inferir la existencia de estructuras geológicas del tipo de las fallas o grandes fracturas de orientación principalmente casi norte – sur ([Figura 17](#)).



**Figura 17.** Algunas estructuras bidimensionales inferidas mediante interpretación de anomalías de VLF y Potencial Espontáneo en el vertedero de Matatlán, indicadas en azul y café. Las curvas que corren paralelas a los bordes del vertedero intentan esbozar cambios de pendientes en los mismos bordes. La localización regional del vertedero es mostrada en la [Figura 3](#).

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo proporcionado en su momento por las instituciones ANUIES y PROMEP, mediante una beca de posgrado. Se está en deuda también con dos árbitros anónimos, cuyos puntos de vista ayudaron a enriquecer el presente escrito..

## REFERENCIAS

1. Birch F. S. (1998). Imaging the water table by filtering self-potential profiles. *Groundwater*, **36**: 779-782.
2. Butler D. K., Llopis J. L. (1990). Assessment of anomalous seepage conditions. *Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater*. Ward, S. H. (Ed.), 153-173, Tulsa, Soc. of Explor. Geophys.
3. Cardarelli E., Bernabini M. (1977). Two case studies of the determination of parameters of urban waste dumps. *Journal Of Applied Geophysics*. **36**: 167-174.
4. Corry C. E. (1985). Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. *Geophysics*, **50**: 1,020-1,034.
5. Corwin R. F., Hoover D. B. (1979). The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, **44**: 226-245.
6. Di Maio R., Patella D. (1994). Self-potential anomaly in volcanic areas, the Mt Etna case history. *Acta vulcanologica*, **4**: 119-124.

7. Ernst K., Scherer H. U. (1986). Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters. *Geophysics*, **51**: 1,967-1,977.
8. Fitterman D. V. (1978). Electrokinetic and magnetic anomalies associated with dilatent regions in a layered earth. *Journal of Geophys. Res.*, **83**: 5,924-5,934.
9. Fitterman D. V. (1979a). Calculation of self-potential anomalies near vertical contacts. *Geophysics*, **44**: 195-205.
10. Fournier C. (1989). Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: Case History of the Chaîne des Puys (Puy-de-Dome, France). *Geophys. Prospect.*, **37**: 647-668.
11. Greenhouse J. P., Harris R. D. (1983). Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study, 7. DC, VLF, and inductive resistivity surveys. *Journal of Hydrology*, **63**: 177-197.
12. Greenhouse J. P. (1991). Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics. The Leading Edge*, **10**: 32-34.
13. Hämmann M., Maurer H. R., Green A. G., Horstmeyer H. (1997). Self-potential image reconstruction: capabilities and limitations. *Jour. of Environ. and Engin. Geophys.*, **2**: 21-35.
14. Heiland C. A. (1940). *Geophysical Exploration*, Prentice-Hall, Inc.
15. Nourbehecht B. Ph D Thesis. (1963). Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems. Mass. Inst. Technol.
16. Ogilvy A. A., Ayed M. A., Bogoslovsky V. A. (1969). Geophysical studies of water leakages from reservoirs. *Geophys. Prospect.*, **17**: 36-62.
17. Pous J., Queralt P., Chavez R. (1995). Lateral and topographic effects in geoelectric soundings. *Journal of Applied Geophysics*, **35**: 237-248.
18. Reynolds J. M., McCann D. M. (1992). Geophysical methods for the assessment of landfill and waste disposal sites. Forde M. C. (Ed.), 63-71, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land*, 1992, Brunel University, London.
19. Reynolds J. M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 796, John Wiley & Sons.
20. Semenov A. S. (1974). *Electrical Prospecting with the Natural Electric Field Method* (En Ruso). Nedra, Leningrad.
21. Senos M. M., Marques da S. M., Ferreira P., Ramalho E. (1994). A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. *Journal of Applied Geophysics*, **32**: 155-162.
22. Sill W. R. (1982). Diffusion coupled (electrochemical) self-potential effects in geothermal areas. DOE/DGE rep. DOE/ID/12079-73, Dept. of Geol. and Geophys., University of Utah.
23. Steeples D. (1991). Uses and techniques of environmental geophysics. *Geophysics: The Leading Edge*, **10**: 30-31.
24. Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. F. (1990). *Applied Geophysics*. Second Edition. 770. Cambridge University Press.
25. Vogelsang D. (1995). *Environmental Geophysics: A Practical Guide*. 173. Springer Verlag.